ChinaXiv合作期刊

第 38 卷第 7 期
2018 年 4 月
生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.38，No.7
Apr.，2018

DOI：10.5846/stxb201703290545
宫大鹏，李炳怡，刘晓东.草原火烧严重度燃烧指数的适用性比较分析.生态学报，2018，38(7)：2434-2441.
Gong D P, Li B Y, Liu X D.Comparative analysis of burn index adaptability when evaluating grassland fire severity.Acta Ecologica Sinica，2018，38(7)：2434-2441.

草原火烧严重度燃烧指数的适用性比较分析

宫大鹏，李炳怡，刘晓东*
北京林业大学林学院，北京　100083

摘要：基于遥感影像的燃烧指数被广泛应用于火烧严重度(fire severity)研究，选取适宜燃烧指数定量评估草原火烧严重度，对草原生态系统植被的恢复与管理具有重要意义。以呼伦贝尔草原火烧迹地为研究区域，基于 landsat8 OLI 影像分别构建 4 种燃烧指数(NBR、NSTV1、dNBR 和 RdNBR)与综合燃烧指数(CBI)的回归模型并进行精度验证，对比分析不同燃烧指数识别草原火烧严重度等级的能力。结果表明：在燃烧指数与 CBI 构建的回归模型中，dNBR 指数的相关性($n=70$，$R^2=0.856$)最高；4 种燃烧指数识别火烧严重度的精度存在差异，中度火烧区域($1<CBI\leqslant2$)内，NSTV1 指数识别精度最高，未过火($CBI=0$)、轻度火烧($0<CBI\leqslant1$)和重度火烧($2<CBI\leqslant3$)区域内，dNBR 指数识别精度均表现最好，分别为 80%、62.5%和 100%；基于不同燃烧指数的草原火烧严重度制图中，dNBR 指数的总体精度同样高于其他燃烧指数，为 82.1%，Kappa 系数高达 0.76。综上所述，dNBR 指数是草原火烧严重度分析与评价的适宜遥感指数。

关键词：草原火；火烧严重度；Landsat8 影像；燃烧指数；差分归一化燃烧率

Comparative analysis of burn index adaptability when evaluating grassland fire severity

GONG Dapeng, LI Bingyi, LIU Xiaodong*
College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, *China*

Abstract: The burn index, based on remote sensing images, is widely used to study fire severity. The quantitative evaluation of grassland fire severity by selecting a suitable burn index has great significance when studying vegetation recovery and management. A burnt area of Hulunbuir pasture land was selected as the study area. Landsat8 OLI images were used to develop a regression model of the Composite Burn Index (CBI) using four different burn indices (Normalized Burn Ratio, NBR; NIR-SWIR-Temperature Version1, NSTV1; differenced Normalized Burn Ratio, dNBR; and Relative differenced Normalized Burn Ratio, RdNBR), and the accuracy of the model was tested. The ability to detect fire severity at different levels by the four different burn indices was compared. The results showed that dNBR ($n=70$, $R^2=0.856$) had the best fitting effect in the polynomial regression model; but there were some differences between the four burn indices when identifying grassland fire intensity at different levels. The NSTV1 index performed best at moderate severity ($1<CBI\leqslant2$). For non-fire ($CBI=0$), low severity ($0<CBI\leqslant1$), and high severity ($2<CBI\leqslant3$), the dNBR index performed best with accuracies up to 80%, 62.5%, and 100%, respectively; A map of grassland fire severity, which was drawn using the dNBR index, had the highest overall accuracy at up to 82.1%. The Kappa coefficient was also up to 0.76. In conclusion, the dNBR index is the most suitable remote sensing index for analyzing and evaluating grassland fire severity.

基金项目：国家重点研发计划课题(2017YFD0600106-6)；国家自然科学基金项目(31270696)；国家林业局野生动植物保护与自然保护区管理司项目

收稿日期：2017-03-29；　**网络出版日期：**2018-01-04

*通讯作者 Corresponding author.E-mail：xd_liu@bjfu.edu.cn

chinaXiv:201804.01734v1
www.ecologica.cn

ChinaXiv合作期刊

Key Words: grassland fire; fire severity; landsat8 OLI; burn index; dNBR(differenced Normalized Burn Ratio)

草原火是自然环境中重要的干扰因子之一[1],在全球范围内频繁发生[2],因其突发性强,破坏性大,极易导致草原生态的退化[3],给牧区经济尤其是畜牧业带来了巨大损失[4]。据统计,1994—2005 年间,呼伦贝尔地区年均发生草原火灾 21 次,年均受害草原面积高达 12 万 hm^2,草原火灾已成为影响呼伦贝尔地区多发的自然灾害之一,因此在该地区开展草原火研究有助于揭示火干扰对草原生态系统各种生态过程的影响,对草原生态系统植被的恢复与管理具有一定的指导意义。

燃烧指数是通过选择对火灾较为敏感的波段进行组合运算,增强图像上火灾区域,可以获取火场范围、火烧严重度等信息,从而进行遥感评估,它被广泛用于火烧严重度研究[5-9]。而基于野外调查的综合燃烧指数(Composite Burn Index,CBI)[10]则是对遥感评估结果进行验证的通用方法,目前已经成为美国林务局(US Forest Service)研究火烧严重度进行野外调查的标准,国内也进行大量尝试研究[11-13],但基本集中于林火烈度的评价。更多研究证明,差分归一化燃烧率(dNBR)比归一化燃烧率(Normalized Burn Ratio,NBR),能更好地反映林火烈度的空间分布情况[7,14-15]。为减少过火前植被对火烈度遥感估测影响,2007 年,Miller 和 Thode[16]提出了相对差分归一化燃烧率(Relative differenced Normalized Burn Ratio,RdNBR),其研究结果表明 RdNBR 指数优于 NBR 和 dNBR 指数。然而,Soverel 等[17]在加拿大西部多个过火区的研究中发现,与 dNBR 指数相比较,RdNBR 指数并未带来火烈度估测精度的提高,这说明遥感定量估测的不确定性,燃烧指数的应用还有待进一步研究验证。近年来随着遥感技术在林火领域应用的成熟,部分学者基于 ETM+、MODIS 等数据对 NBR 等燃烧指数进行改进[18-19],得到亮温调整燃烧率(Normalized Burn Ratio Thermal, NBRT)、亮温调整燃烧率第一类型(NIR-SWIR-Temperature Version 1, NSTV1)、发射率调整燃烧率第一类型(NIR-SWIR-Emissivity Version1, NSEV1)等燃烧指数,研究表明火灾后热红外波段监测到的亮温升高可以改进燃烧指数,同样能够很好的区分火烧严重度。

遥感影像提取植被信息具有精度高、范围广和成本低等特点,因此建立基于野外实测的综合燃烧指数(CBI)与遥感光谱指数之间的相关性来提取火烧严重度信息,成为林火烈度评价常用方法之一[6,8-9,20-21]。然而大部分研究利用单一指数进行评价,且指数选用又不尽相同,无法确定选取的遥感评估指数是否适用于研究区域。为此,本文尝试将适用于林火评价的燃烧指数应用于草原火,分析不同燃烧指数识别火烧严重度的差异,确定适用于草原火灾分析和评价的适宜燃烧指数,为火后植被恢复与管理研究提供一定的借鉴和参考。

1　研究区概况

本研究的实验区域位于中国内蒙古自治区呼伦贝尔地区,范围在 117°18′22″—117°40′58″E 和 49°21′26″—49°35′28″N 之间,东西长约 27.5km,南北宽 28.5km,地处呼伦贝尔草原西北部,额尔古纳河为界与俄罗斯接壤,海拔 650—700m,坡度比较平缓。研究区属于中温带大陆性草原气候,降水量小,季节分配不均,最高、最低温度出现在夏季和冬季,年平均气温 0.7℃,年均降水量 300mm 左右,降水集中在 7、8 月份,土壤类型以栗钙土为主。生态系统植被资源丰富,主要的植被群落有贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)群落,线叶菊(*Filifolium sibiricum*)群落和羊草(*Leymus chinensis*)群落。呼伦贝尔地区春秋两季枯枝落叶丰厚,气候干旱,草原火频繁发生,2015 年 4 月 16 日呼伦贝尔地区新巴尔虎右旗和满洲里交界处,发生一起草原大火,过火面积约为 6000hm^2(图 1)。

2　研究方法

2.1　遥感数据

本研究使用遥感数据从美国地质调查局(United States Geological Survey,USGS)网站下载,经过几何精校正处理的 L1T 级别 Landsat8 OLI 影像。由于草地更新速度较快,火灾对草地的影响主要在火后早期[22],为保

chinaXiv:201804.01734v1

ChinaXiv合作期刊

证信息提取的精确性,选取火前(2015 年 4 月 14 日)和火后(2015 年 5 月 16 日)相距时间最短的 2 景云量较少的遥感影像,轨道号为 PATH125/ROW26,分辨率 30m(其中全色波段分辨率 15m),质量满足使用需求。Landsat8 OLI 影像为 L1T 级别,经过地面控制点和数字高程模型数据进行精确校正,但还未进行辐射定标、大气校正和影像剪裁等预处理。使用 ENVI 5.2 软件对图像数据进行以上预处理后,利用 Spectral Indices 和 Band math 工具对预处理后的影像分别计算归一化燃烧率(Normalized Burn Ratio, NBR)、亮温调整燃烧率第一类型(NIR-SWIR-Temperature Version 1, NSTV1)、差分归一化燃烧率(differenced Normalized Burn Ratio, dNBR)和相对差分归一化燃烧率(Relative differenced Normalized Burn Ratio, RdNBR),4 种燃烧指数由预处理后影像内的不同波段计算而来,见表 1。

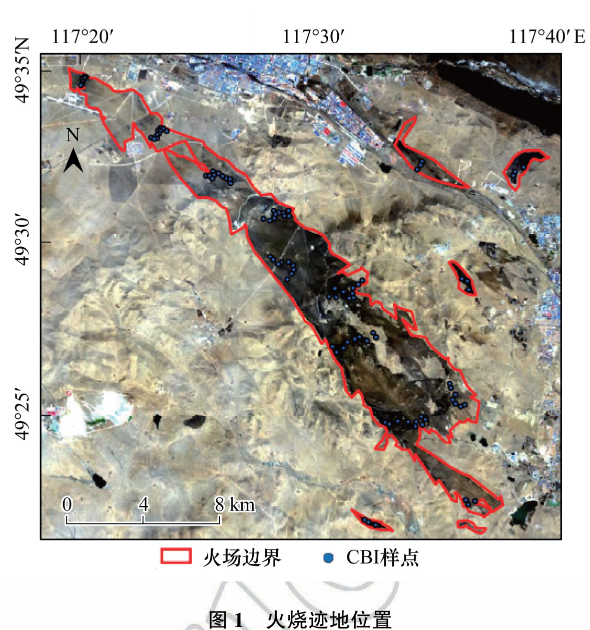


图 1 火烧迹地位置

Fig.1 Position of burned area

表 1 燃烧指数

Table 1 Burn index

指数名称 Index name	英文名称 English name	公式 Formula	参考文献 References
归一化燃烧率	Normalized Burn Ratio(NBR)	$NBR=\frac{NIR-LSWIR}{NIR+LSWIR}$	[23]
亮温调整燃烧率第一类型	NIR-SWIR-Temperature Version 1 (NSTV1)	$NSTV1=\frac{NIR-LSWIR}{NIR+LSWIR}\times T$	[18]
差分归一化燃烧率	differenced Normalized Burn Ratio (dNBR)	$dNBR=NBR_{火前}-NBR_{火后}$	[10]
相对差分归一化燃烧率	Relative differenced Normalized Burn Ratio(RdNBR)	$RdNBR=\frac{NBR_{火前}-NBR_{火后}}{\sqrt{ABS(NBR_{火前})}}$	[16]

NIR:近红外,Near Infrared;LSWIR:长短波红外,Longer Short-wave Infrared;T:亮温/10000,Temperature/10000

2.2 综合燃烧指数(CBI)

综合燃烧指数(CBI)是基于野外地面调查,通过多层次多因子叠加后所求得的平均变化值。本研究结合该地区草原的演替历史、植被类型等特征,对 Key 和 Benson[10] 的调查标准进行改进(表 2),在每个调查样地按垂直高度分 2 个层次调查:A)地表可燃物和土壤;B)草本和低矮灌木。在每一调查层都有若干个观测变量,变量取值范围为 0—3(0 代表未火烧;1 代表轻度火烧;2 代表中度火烧;3 代表重度火烧),然后对各层的估测值加以综合,最终求出样点 CBI 平均值。根据每个样点 CBI 均值,划分为 3 个等级,即为轻度火烧(low severity, 0<CBI≤1)、中度火烧(moderate severity, 1<CBI≤2)和重度火烧(high severity, 2<CBI≤3)。

为保证实际测得 CBI 和 OLI 遥感影像最小像元在空间位置和大小保持一致,选取 30m×30m 的矩形样地进行调查,于 2015 年 5 月中旬共获取研究区域内 98 个样点的 CBI 数据,将其随机分为两组,70 个 CBI 样点用于构建回归模型,剩余 28 个 CBI 样点用于精度验证(表 3)。不同 CBI 阈值均有样点分布,能够满足模型构建和精度验证需要。

2.3 研究方法

首先利用 ENVI 5.2 软件的 Spectral Indices 和 Band Math 工具对预处理后的影像分别计算 4 种燃烧指数(表 1)。同时利用 ArcGIS 10.2 软件 Spatial Analyst Tools 中的 Extract Value to Points 工具,获得与地面实际调查 CBI 样点对应的各燃烧指数值。而后利用 SPSS 19.0 工具,建立 CBI 值和各燃烧指数值的回归方程,分析

chinaXiv:201804.01734v1
www.ecologica.cn

ChinaXiv合作期刊

相关性。根据回归方程所确定的各燃烧指数阈值,利用 ENVI 5.2 软件的 Color Slices 工具,绘制基于各燃烧指数的草原火烧严重度分级图。最后,基于 CBI 验证样点数据,利用混淆矩阵进行拟合结果的分析评价。混淆矩阵(confusion matrix)通常用于遥感影像分类后的精度评价,是通过将每个地表真实像元的位置和分类与分类图象中的相应位置和分类像比较计算。

表 2　综合燃烧指数(CBI)调查内容和评价标准

Table 2　Investigation items and evaluation criterion of Composite Burn Index (CBI)

分层 Strata	火烧特征 Burn attributes	草原火烧严重度 Grassland fire severity			
		未过火 0 Non-fire	轻度 0—1 Low	中度 1—2 Moderate	重度 2—3 High
A	枯枝落叶等可燃物消耗	无变化	50%枯枝落叶被消耗	100%枯枝落叶被消耗	80%细可燃物被消耗
	半腐殖质	无变化	轻度燃烧	50%消耗	100%消耗
	新生裸露岩石、土壤的盖度/颜色	无变化	10%发生改变	40%发生改变	>80%发生改变
B	叶片变化率/%	无变化	30	80	>95
	存活率/%	100%	90	50	<20
	植物定植	无变化	低	中	高—无
	物种组成/多样性	无变化	变化小	变化中等	变化大
	盖度变化率/%	无变化	15	70	>90

A:地表可燃物和土壤,surface fuel and soil;B:草本和低矮灌木,herb and low shrub

表 3　CBI 样点统计

Table 3　Statistics for the CBI plots

CBI 阈值 Thresholds	样点数(建模/验证) Number	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean	标准差 Standard deviation
0	12,5	0	0	0	0
(0, 1]	18,8	0.05	1.00	0.55	0.342
(1, 2]	20,7	1.10	2.00	1.50	0.277
(2, 3]	20,8	2.01	3.00	2.53	0.307

3　结果和分析

3.1　燃烧指数与 CBI 相关性分析

基于 Landsat8 影像提取的燃烧指数 NBR、NSTV1、dNBR 和 RdNBR,分别与野外调查获取的 CBI 数据进行相关性分析,结果如图 2 所示。

(1)回归分析结果表明,随着综合燃烧指数(CBI)的升高,NBR 和 NSTV1 指数均呈现明显下降趋势,表现为负相关关系(图 2),相反,dNBR 和 RdNBR 指数呈现上升趋势,表现为正相关关系(图 2)。与谭柳霞等[7]关于林火烈度的研究结果一致。由于过火区域植被种类数量和土壤侵蚀程度存在差异,同一场火烧使得不同空间位置的生态系统破坏程度出现差异,即存活植被的类型数量越少土壤侵蚀严重,则生态系统破坏程度越高,CBI 值也就越高;同理,草原火过后利用植被状态敏感波段的光谱反射率构建的 NBR 和 NSTV1 指数,能够在一定程度上反映火后不同空间位置存活植被的状态,存活植被数量和类型越多,NBR 和 NSTV1 指数值越高,CBI 则越低。因此,NBR 和 NSTV1 指数与 CBI 之间表现为负相关。而 dNBR 和 RdNBR 指数是基于火前和火后两景遥感图像获取的差分燃烧指数,即遥感指数的减少量越大,火烧破坏程度越大,CBI 值也就越高,因此,呈正相关。

(2)4 种燃烧指数与 CBI 指数拟合结果的相关系数由大到小依次为 dNBR(R^2=0.856),NSTV1(R^2=0.762),NBR(R^2=0.749)和 RdNBR(R^2=0.574)。因此,dNBR 值和 CBI 值之间的非线性正相关关系(n=70,R^2=0.856)表现最好,说明 dNBR 阈值的选取对该地区草原火烧严重度的分类具有相对可靠性。

(3)NBR 和 NSTV1 是基于火后一景遥感图像获取的单一燃烧指数,而 dNBR 和 RdNBR 是基于火前和火

chinaXiv:201804.01734v1

www.ecologica.cn

ChinaXiv合作期刊

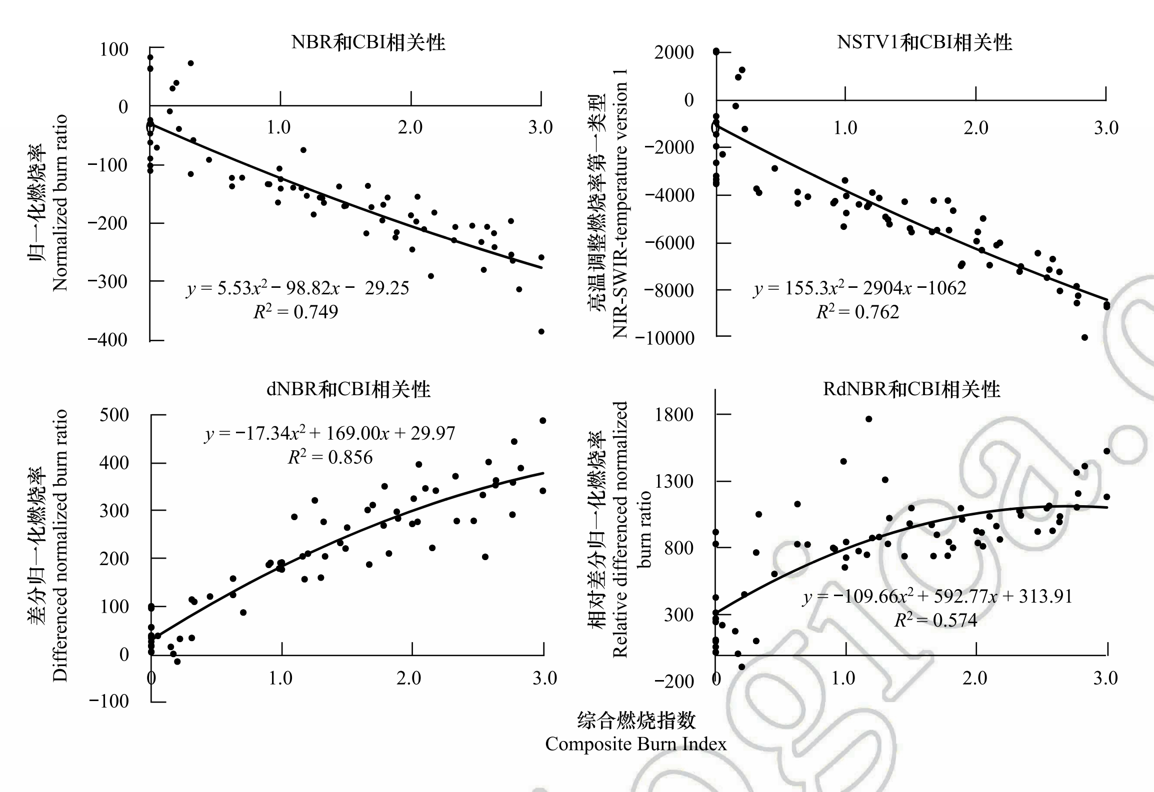


图 2 研究区燃烧指数和 CBI 的相关性分析图

Fig.2 Correlation analysis plot of burn index values and CBI values in study area

NBR:归一化燃烧率,Normalized Burn Ratio;NSTV1:亮温调整燃烧率第一类型,NIR-SWIR-Temperature Version 1;dNBR:差分归一化燃烧率,differenced Normalized Burn Ratio;RdNBR:相对差分归一化燃烧率,Relative differenced Normalized Burn Ratio

后两景遥感图像获取的差分燃烧指数。从图 2 上可以看出,单一燃烧指数 NBR 和 NSTV1 变化趋势一致,与 CBI 呈现负相关,两者对火烧严重度信息提取的精度相差很少($\Delta R^2 = 0.013$)。而差分燃烧指数 dNBR 和 RdNBR 表现正相反,与 CBI 呈现均为负相关,但两者对于火烧严重度信息提取的精度相差很大($\Delta R^2 = 0.282$),dNBR 优于 RdNBR。

3.2 基于不同燃烧指数的草原火烧严重度分级图

根据不同燃烧指数与 CBI 的相关性分析结果,获得 NBR、NSTV1、dNBR 和 RdNBR 指数与 CBI 之间的回归方程,分别为:

$$\text{NBR} = 5.53\ \text{CBI}^2 - 98.82\ \text{CBI} - 29.25,\ R^2 = 0.749 \quad (1)$$

$$\text{NSTV1} = 155.3\ \text{CBI}^2 - 2904\ \text{CBI} - 1062,\ R^2 = 0.762 \quad (2)$$

$$\text{dNBR} = -17.34\ \text{CBI}^2 + 169.00\ \text{CBI} + 29.97,\ R^2 = 0.856 \quad (3)$$

$$\text{RdNBR} = -109.66\ \text{CBI}^2 + 592.77\ \text{CBI} + 313.91,\ R^2 = 0.574 \quad (4)$$

根据 CBI 火烧严重度的阈值,通过回归方程分别确定 4 种燃烧指数的分级阈值(表 4),利用 ENVI 5.2 软件 Color Slices 工具,分别绘制出基于不同燃烧指数的草原火烧严重度分级图(图 3),用于后续拟合结果的分析评价。

表 4 各燃烧指数火烧严重度阈值

Table 4 Thresholds of each burn index of fire severity

火烧严重度 Fire severity	NBR	NSTV1	dNBR	RdNBR
未过火 0 Non-fire	>-29	>-1062	<30	<314
轻度(0,1] Low	(-123,-29]	(-3811,-1062]	[30,182)	[314,797)
中度(1,2] Moderate	(-205,-123]	(-6240,-3811]	[182,299)	[797,1061)
重度(2,3] High	<-205	<-6249	>299	>1061

chinaXiv:201804.01734v1

www.ecologica.cn

ChinaXiv合作期刊

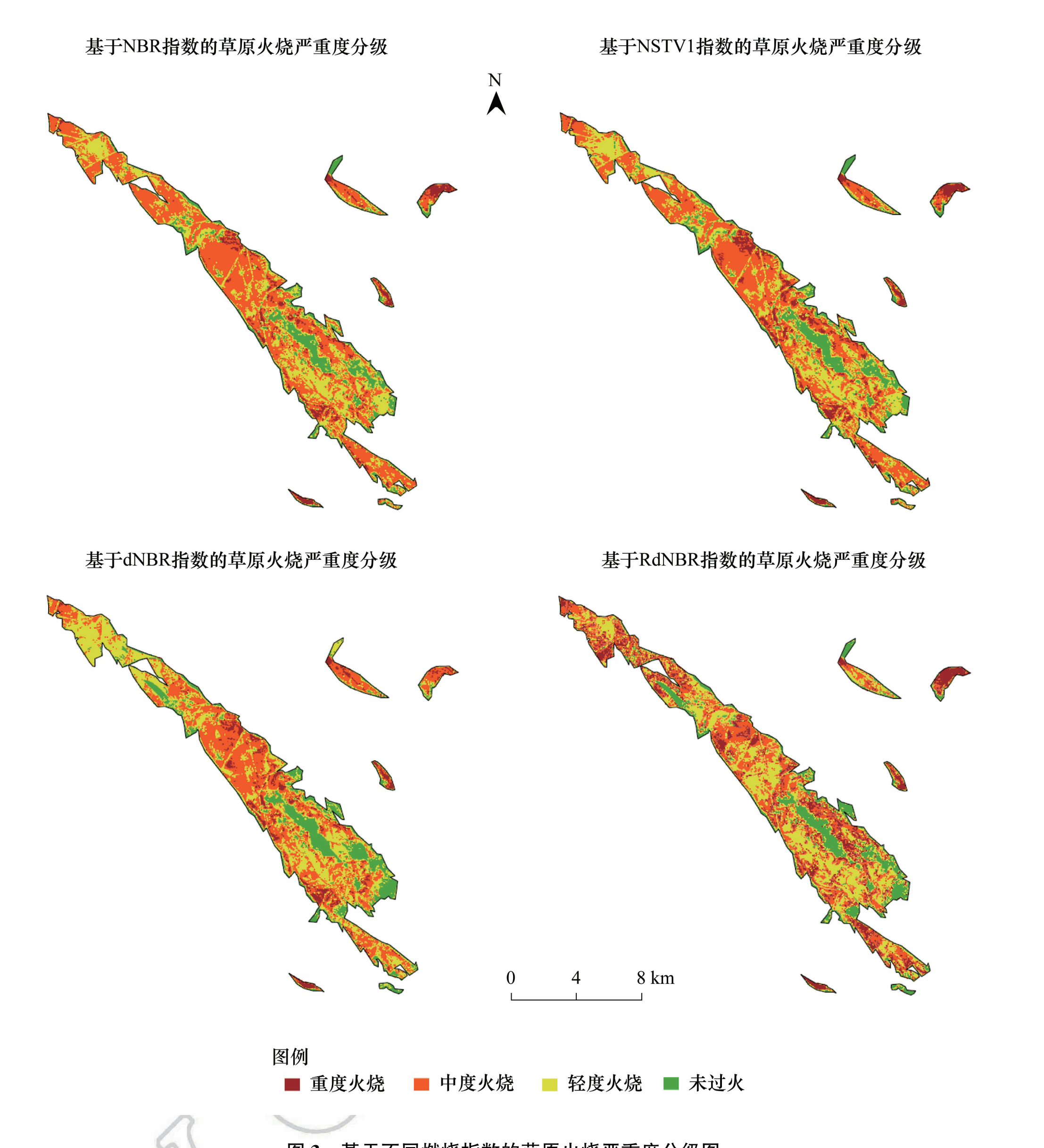


图 3　基于不同燃烧指数的草原火烧严重度分级图

Fig.3　Map of fire severity based on different burn index

3.3　拟合结果评价

利用混淆矩阵可以直接计算分类后的总体分类精度、用户精度和 Kappa 系数等评价指标。

表 5　基于验证样点的精度评价

Table 5　Accuracy evaluation based on test plot

燃烧指数 Burn index	未过火/% Non-fire	轻度火烧/% Low severity	中度火烧/% Moderate severity	重度火烧/% High severity	总体分类精度/% Overall accuracy	Kappa 系数 Kappa coefficient
NBR	80.0	50.0	85.7	87.5	75.0	0.665
NSTV1	60.0	37.5	100.0	87.5	71.4	0.618
dNBR	80.0	62.5	85.7	100.0	82.1	0.760
RdNBR	60.0	37.5	57.1	75.0	57.1	0.422

表中未过火、轻度、中度、重度火烧对应的精度均为混淆矩阵结果中的用户精度(User's Accuracy)

(1)从表 5 可以看出,基于 dNBR 指数的火烧严重度分级图总体精度最高,达到 82.1%,相对应的 Kappa 系数也高达 0.76。而 RdNBR 指数表现最差,总体精度为 57.1%,Kappa 系数为 0.422。这一精度验证结果与

chinaXiv:201804.01734v1

ChinaXiv合作期刊

回归分析精度 R^2 的表现一致。RdNBR 的提出[16]，旨在减少过火前植被数量对火烈度遥感估测的影响，通常在植被类型差异比较大的情况下 RdNBR 的精度高于 dNBR[24-25]。对于研究区域内以典型草原、沙生和盐生植被为主的植被群落，相对于森林生态系统结构单一，垂直变化幅度小，火烧的影响主要体现在植被盖度，可燃物消耗以及土壤侵蚀等方面，因此，RdNBR 在研究区域内反而会表现不如 dNBR，这与 Soverel 等[12]的研究结果一致。由此说明，遥感燃烧指数的估测能力受估测精度及其背景因素的影响较大。

（2）4 种燃烧指数对于未过火区域（CBI＝0）和重度火烧区域（2<CBI≤3）均能较好的识别，其中 dNBR 精度最高，分别为 80%和 100%；4 种燃烧指数对于不同的火烧严重度分级存在一定差异，未过火、轻度和重度火烧区域内，dNBR 提取精度均表现最好，在中度火烧区域（1<CBI≤2）内，NSTV1 的提取精度最高；然而相对于其他火烧严重度，4 种燃烧指数对轻度火烧区域（0<CBI≤1）的提取能力表现较差，精度范围为 37.5%—62.5%。

（3）从图 2 和图 3 中可以看出，NSTV1 的拟合精度为 76.2%，略高于 NBR 的 74.9%，NSTV1 的火烧分级图效果相对较好，主要原因 NSTV1 是在 NBR 的基础上，使用了一个热红外波段，对火灾后光谱特征变化进行非线性拉伸增强，能更好的分离燃烧区和非燃烧区。而在精度验证时，NBR 和 NSTV 指数提取火烧严重度信息的总体精度比较接近，分别为 75.0%和 71.4%，NBR 指数表现稍好，原因在于验证样本数量限制，不能全面系统的反应整个火场的火烧严重度分级情况。

4 结论与讨论

基于 landsat8 OLI 影像分别构建 4 种燃烧指数（NBR、NSTV1、dNBR 和 RdNBR）与综合燃烧指数（CBI）的回归模型并进行精度验证，对比分析不同燃烧指数识别草原火烧严重度等级的能力。结果表明：对于植被相对单一的草原生态系统，以火灾发生前后遥感指数的减少量作为火烧严重度评价标准的 dNBR 指数，是草原火烧严重度分析与评价的适宜遥感指数。4 种燃烧指数由 OLI 影像内的不同波段计算获得，而不同波段对于火烧迹地的区分度存在差异[26]，因此 4 种燃烧指数识别不同等级火烧严重度的精度也存在差异，如 NSTV1 的火烧分级图效果好于 NBR，主要原因在于 NSTV1 在 NBR 的基础上，使用了一个热红外波段，对火灾后光谱特征变化进行非线性拉伸增强，能更好的分离燃烧区和非燃烧区。与 NBR、NSTV1 和 RdNBR 相比较，dNBR 指数在构建模型（$R^2=0.856$）和精度验证（总体精度：82.1%）中均表现最好。

与谭柳霞等[7]、Musyimi 等[9]关于森林火灾的研究相比，本研究中 dNBR 指数拟合与验证精度更高，这与综合燃烧指数（CBI）的野外实测有着直接关系。与森林生态系统相比，草原火烧严重度调查的层次减少，影响因子也因此更少，所以 CBI 与 dNBR 指数拟合结果更为接近。同时遥感数据源的空间分辨率也是影响模型拟合和结果验证的重要因素。燃烧指数评估火烧严重度的能力由于受气候、地形和植被类型等因素的影响，表现出空间异质性，现阶段大量研究集中于林火烈度。未来可以借助高分辨率遥感影像，结合地面调查，开展广域尺度上草原火研究，深入研究地形、气象、可燃物及其相互作用对火烧严重度空间异质性的影响等。

参考文献（References）：

[1] 雒瑞森. 全球火格局的时空变异及其机理分析[D]. 杭州：浙江大学，2013.
[2] 张正祥，张洪岩，李冬雪，许嘉巍，周道玮. 呼伦贝尔草原人为火空间分布格局. 生态学报，2013，33(7)：2023-2031.
[3] 周广胜，卢琦. 气象与森林草原火灾. 北京：气象出版社，2009：4-5.
[4] 陈世荣. 草原火灾遥感监测与预警方法研究[D]. 北京：中国科学院研究生院（遥感应用研究所），2006.
[5] 常禹，陈宏伟，胡远满，冯玉婷，李悦. 林火烈度评价及其空间异质性研究进展. 自然灾害学报，2012，21(2)：28-34.
[6] Stambaugh M C，Hammer L D，Godfrey R. Performance of burn-severity metrics and classification in oak woodlands and grasslands. Remote Sensing，2015，7(8)：10501-10522.
[7] 谭柳霞，曾永年，郑忠. 林火烈度遥感评估指数适应性分析. 国土资源遥感，2016，28(2)：84-90.
[8] Chang Y，Zhu Z L，Feng Y T，Li Y H，Bu R C，Hu Y M. The spatial variation in forest burn severity in Heilongjiang Province，China. Natural Hazards，2016，81(2)：981-1001.

chinaXiv:201804.01734v1
www.ecologica.cn

ChinaXiv合作期刊

[9] Musyimi Z, Said M Y, Zida D, Rosenstock T S, Udelhoven T, Savadogo P, de Leeuw J, Aynekulu E. Evaluating fire severity in Sudanian ecosystems of Burkina Faso using Landsat 8 satellite images. Journal of Arid Environments, 2017, 139: 95-109.

[10] Key C H, Benson N C. Landscape Assessment: sampling and analysis methods//Lutes D C, Keane R E, Caratti J F, Key C H, Benson N C, Sutherland S, Gangi L J, eds. FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. General Technical Report RMRS-GTR-164-CD. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006.

[11] 孔博, 张树清, 张柏, 那晓东, 李晓峰, 卢晓宁. 扎龙湿地火烧严重度分析及火灾对丹顶鹤生境的影响. 湿地科学, 2007, 5(4): 348-355.

[12] 王晓莉, 王文娟, 常禹, 冯玉婷, 陈宏伟, 胡远满, 池建国. 基于 NBR 指数分析大兴安岭呼中森林过火区的林火烈度. 应用生态学报, 2013, 24(4): 967-974.

[13] 杨达, 吴志伟, 梁宇, 贺红士. 林火烈度的量化指标构建. 林业资源管理, 2014, (6): 140-145.

[14] van Wagtendonk J W, Root R R, Key C H. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(3): 397-408.

[15] Allen J L, Sorbel B. Assessing the differenced Normalized Burn Ratio's ability to map burn severity in the boreal forest and tundra ecosystems of Alaska's national parks. International Journal of Wildland Fire, 2008, 17(4): 463-475.

[16] Miller J D, Thode A E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). Remote Sensing of Environment, 2007, 109(1): 66-80.

[17] Soverel N O, Perrakis D D B, Coops N C. Estimating burn severity from Landsat dNBR and RdNBR indices across western Canada. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(9): 1896-3219.

[18] Veraverbeke S, Harris S, Hook S. Evaluating spectral indices for burned area discrimination using MODIS/ASTER (MASTER) airborne simulator data. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(10): 2702-2709.

[19] Smith A M S, Drake N A, Wooster M J, Hudak A T, Holden Z A, Gibbons C J. Production of Landsat ETM+ reference imagery of burned areas within southern African savannahs: comparison of methods and application to MODIS. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(12): 2753-2775.

[20] Otto R, García-del-Rey E, Muñoz P G, Fernández-Palacios J M. The effect of fire severity on first-year seedling establishment in a *Pinus canariensis* forest on Tenerife, Canary Islands. European Journal of Forest Research, 2010, 129(4): 499-508.

[21] Zheng Z, Zeng Y N, Li S N, Huang W. A new burn severity index based on land surface temperature and enhanced vegetation index. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 45: 84-94.

[22] Pereira P, Cerda A, Martin D, Úbeda X, Depellegrin D, Novara A, Martínez-Murillo J F, Brevik E C, Menshov O, Comino J R, Miesel J. Short-term low-severity spring grassland fire impacts on soil extractable elements and soil ratios in Lithuania. Science of the Total Environment, 2017, 578: 469-475.

[23] López-García M J, Caselles V. Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data. Geocarto International, 1991, 6(1): 31-37.

[24] Miller J D, Knapp E E, Key C H, Skinner C N, Isbell C J, Creasy R M, Sherlock J W. Calibration and validation of the relative differenced Normalized Burn Ratio (RdNBR) to three measures of fire severity in the Sierra Nevada and Klamath Mountains, California, USA. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(3): 645-656.

[25] Miller J D, Safford H D, Crimmins M, Thode A E. Quantitative evidence for increasing forest fire severity in the Sierra Nevada and southern Cascade Mountains, California and Nevada, USA. Ecosystems, 2009, 12(1): 16-32.

[26] 吴立叶, 沈润平, 李鑫慧, 杨恒. 不同遥感指数提取林火迹地研究. 遥感技术与应用, 2014, 29(4): 567-574.

chinaXiv:201804.01734v1

www.ecologica.cn